

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

# 博士論文審査報告書

## 論 文 題 目

粒度幅が極端に広い材料からなる河床の  
動的平衡状態と流砂現象の解明

Dynamic equilibrium state of riverbed  
composed of extremely wide range of  
sediment grain sizes and sediment  
transport

申 請 者

平松	裕基
Yuki	HIRAMATSU

建設工学専攻 河川工学研究

2016 年 10 月

河川上流域にダムを建設すると、時間の経過とともにその直下流の河川区間で「河床低下」と「材料の粗粒化」が進行する。「粗粒化」とは、河床を構成していた微細材料を含む砂礫が抜け出し、河床表面に大きな石礫が露出した状態となることを指す。その結果、大きな石礫からなる河床骨格の間隙部分にしか砂礫あるいはシルトが残らなくなるため、平地を流れる河川に比べ、河床構成材料の最大粒径と最小粒径との間の幅が極端に大きな状態となる。本研究では、このような特徴をもつ河床を「粒度幅が極端に広い材料からなる河床」と呼び、平衡状態における河床の鉛直構造と土砂移動現象のメカニズムについて明らかにすることを目指している。なお、平衡状態とは、河床が時空間的に変化しなくなる状態のことを指す。このうち、土砂が移動している場合を動的平衡状態、土砂移動が一切生じない条件下のものを静的平衡状態と呼ぶ。大きな石礫の間隙に存在する中小の大きさの砂礫あるいはシルトの移動形態は以下の通りである。中粒径の砂礫は「掃流砂」として河床近傍を移動し、小粒径の細砂あるいはシルトは水面付近にまで到る「浮遊砂」として移動する。これらの土砂は大礫群の遮蔽の影響を顕著に受ける。ここに、「遮蔽」とは、大礫群の露出の度合いが大きくなるにつれて、その間隙に存在する砂礫あるいはシルトに作用するせん断力が小さくなる現象のことを指す。そして、これらの砂礫ならびにシルトの時空間的な輸送量の違いが河床変動を引き起こす。河床低下などの問題は、橋脚の露出など河川構造物への被害だけでなく、河川環境の悪化や生態系にも影響を与えている。これに対して、置き砂や排砂などの対策が試みられている。しかし、その効果は長期にわたるモニタリングによって評価されているにすぎず、土砂移動現象を力学原理に則り十分な予測精度で説明することはできないのが現状である。

土砂の移動に関する既往の研究は、河床が均一粒径の砂礫からなる河床を対象として行われてきた。その後、この考え方を複数粒径からなる混合粒径河床を取り扱えるものに拡張してきた。しかし、これらの既往研究では平地の河川を対象としてきたため、粒度幅が本研究で対象とするような移動床現象を対象としたものはなされていない。そこで、平地を流れる河川で生じている現象を説明することはできても、河川上流域のダム直下で問題となっているような現象を説明することはできなかった。

本論文は序論から結論までの6章で構成されている。

第1章では「序論」として、本研究の目的と背景、着想について述べられている。

第2章では「既往の研究と本研究の位置づけ」として、関連する既往の研究について説明するとともに、本研究の位置づけが明らかにされている。

第3章では「実験の概要」として、装置と河床材料についてまず説明されている。次に、実験条件と計測項目について述べられている。河床材料は、一般に、移動しない大粒子、掃流砂として移動する中粒子、浮遊砂として移動する小粒子の三つの粒径集団に分けられる。本研究では、これらの粒径集

団を L 粒子, M 粒子, S 粒子と呼び, それぞれ一つの粒径で代表させるとした基礎的な移動床実験が行われた. これらの粒径の間には 1 オーダー程度の差がある. すなわち, 最大と最小の粒径は 2 オーダー異なる. 河床を構成している材料のうち, L 粒子は上流側から供給されることはないものとし, 水流によって移動可能な M 粒子と S 粒子だけが供給されるものとして実験が行われている. 動的平衡状態における河床の鉛直構造に影響を与える因子としては, 河床に作用する掃流力の平均値, M 粒子ならびに S 粒子の供給量が挙げられる. これらの値を系統的に変化させることにより, 動的平衡状態における河床の鉛直構造がどのように変化するかについて検討された. 初期河床としては, 動的平衡状態における河床の高さより下方に設定する場合と上方にする場合とが考えられる. 下方とする場合として, 初期河床を静的平衡状態とした. また, 上方とする場合として, 初期河床を L 粒子の頂部まで M 粒子と S 粒子を充填した状態にした実験もあわせて行うことにより, 初期河床の違いが鉛直構造に与える影響についても調べられている.

第 4 章では「河床における遮蔽効果」として, L 粒子が M 粒子あるいは S 粒子に与える遮蔽効果について検討された. 遮蔽効果を明らかにするため, L 粒子と M 粒子, あるいは L 粒子と S 粒子という二つの粒径からなる河床の静的平衡状態に着目した実験が行われた. その結果, L 粒子が与える遮蔽の関係を実験的に導いた. 次に, 三つの粒径集団からなる河床の静的平衡状態に関する実験を行うと, 河床表面に L 粒子だけでなく M 粒子のみからなる層 (M 粒子層) が形成されることが理解された. このように, L 粒子群の間隙内で顕著な鉛直分級が生じる. さらに, M 粒子層がその下方に位置する S 粒子に与える遮蔽の関係について検討された. これらの関係を用いると, 河床に作用する掃流力の平均値から, L 粒子, M 粒子, S 粒子のそれぞれの上面に作用する値を推定することができる.

第 5 章では「動的平衡状態における河床の鉛直構造」として, 河床に作用する掃流力の平均値と M 粒子の供給量を固定して, S 粒子の供給量を異なる値に設定した実験の結果について説明されている. S 粒子の供給量に応じて河床の状態は Stage 1~4 に分けられることを明らかにしている. Stage 1 とは S 粒子の供給量が相対的に小さい条件に相当し, 静的平衡状態と同様 M 粒子層が現れる状態になる. S 粒子の供給量がある値まで大きくなると, M 粒子層の上面まで S 粒子によって充填される. このように M 粒子と S 粒子の上面の高さが一致した状態を Stage 2 と呼ぶ. S 粒子の供給量がさらに大きくなると, M 粒子ならびに S 粒子上面の位置が高い状態で動的平衡状態に到る. これを Stage 3 と呼ぶ. 供給量が大きくなると最終的には L 粒子の頂部まで M 粒子と S 粒子が充填された状態になる. これが Stage 4 に相当する状態である. これより供給量を大きく設定すると, L 粒子の頂部より上方に M 粒子と S 粒子が堆積する. すなわち, 河床表面が M 粒子と S 粒子のみによって構成される状態になるため, 関根ら (2005) により提案された「礫・シ

ルト充填河床モデル」などの従来の考え方に基づいて流砂現象を取り扱うことができる．そこで，これについては本研究で取り扱うことはしていない．初期河床を静的平衡状態にすると，堆積が卓越する過程を経て動的平衡状態に到る．このような条件下では，供給されてきた M 粒子と S 粒子が堆積した層（混合層）はさらに二層に分けられる．上方に位置するものを交換層，下方に位置するものを堆積層と呼ぶ．交換層内の粒子は流砂と絶えず交換を繰り返しているものの，堆積層内の粒子は流砂の影響を受けて入れ替わることはない．この交換層と堆積層のそれぞれの構造について調べた．この構造を特徴づける値は，空隙率ならびに M 粒子と S 粒子の総和に占める M 粒子の体積比率の二つである．その結果，二つの層内の構造の間にはほとんど違いはないことが明らかになった．Stage 1 ならびに 2 における混合層内の M 粒子の相互間距離は静的平衡状態の M 粒子層内の値と同じになることが明らかにされた．これは，動的平衡状態に到るまでに供給された M 粒子が，静的平衡状態における M 粒子層と同様の構造となるように堆積することを意味している．一方，Stage 3 ならびに 4 では，混合層内の M 粒子同士の相互間距離が大きな状態になった．なお，河床に作用する掃流力の平均値ならびに M 粒子の供給量を異なる値に設定した実験の結果を比較すると，S 粒子の供給量に伴う河床の鉛直構造の変化には定性的な違いはないことが確認された．また，初期河床を L 粒子の頂部まで M 粒子と S 粒子を充填した状態とした実験を行うと，堆積層が現れることはなかった．ただし，河床表面の高さならびに交換層内の構造には違いがないことが明らかにされた．

第 6 章では「結論」として，本論文のまとめと今後の課題について述べられている．本研究の成果はあくまでも基礎的なものであり，実河川に適用するにはいくつかの課題が残されている．本論文では，河床材料を三つの粒径集団に分け，それぞれ一つの粒径で代表させることにした．しかし，実河川ではそれぞれの粒径集団は一つの粒径ではなく，複数の粒径をもつ材料によって構成されている．ただし，それぞれの粒径集団をさらに細分化して考えることによって，粒度幅が極端に広い河床上で生じる土砂の移動現象の本質を捉えることができるものと考えられる．以上のとおり本研究の成果は移動床水理学のみならず河川工学の発展に寄与するところ大であり，よって博士（工学）の学位論文として価値あるものと認められる．

2016 年 9 月

審査員

主査 早稲田大学教授 工学博士 早稲田大学 関根 正人

副査 早稲田大学教授 工学博士 東京大学 柴山 知也

副査 早稲田大学教授 工学博士 名古屋大学 榊原 豊